第46卷 第9期
2023年9月

干旱区地理
ARID LAND GEOGRAPHY

Vol. 46 No. 9
Sep. 2023

博尔塔拉河源流区径流对气候变化的响应及预测

田昊玮[1,2]， 陈伏龙[1]， 龙爱华[1,2]， 刘 静[2,3]， 海 洋[2]

（1. 石河子大学水利建筑工程学院，新疆 石河子 832000；2. 中国水利水电科学研究院水资源所，北京 100038；
3. 天津大学水利工程仿真与安全国家重点实验室，天津 300072）

摘 要：冰川径流是西北干旱区径流的主要组成部分，研究未来气候变化对冰川径流的影响对西北干旱区径流至关重要。以博尔塔拉河上游源流区为研究区，构建嵌入冰川模块的SWAT模型，模拟温泉水文站1972—2018年月径流过程，并在此基础上研究了气候变化情景下（RCP4.5和RCP8.5）未来（2020—2050年）气候变化对冰川径流的影响。结果表明：SWAT模型能够很好地模拟源流区径流变化过程，在整个模拟期间，径流数据的纳什系数（NSE）为0.82，偏差百分比（PBIAS）为−3.22%，均方根误差与实测值标准差的比值（RSR）为0.42，决定性系数（R^2）为0.84，模型性能评定为优。根据CMIP5气候模式2种情景的模拟结果，2种情景模拟未来总径流都呈现出增加趋势，分别将以$0.31×10^8$ $m^3·(10a)^{-1}$和$0.40×10^8$ $m^3·(10a)^{-1}$的速度继续增加，冰川径流占比较历史时期的27.61%分别提升了4.84%和9.38%。冰川径流增加是径流量增加的主要原因。通过相关性分析发现，随着气温的升高，冰川消融时间提前，冰川消融加速，冰川积累时间减少，导致冰川面积进一步的缩减。研究结果可为博河地区水文资料历史变化、未来演变趋势和预防气候变化带来的潜在风险提供依据。

关 键 词：SWAT模型；气候变化；CMIP5气候情景模式；冰川径流；博尔塔拉河
文章编号：1000－6060(2023)09－1432－11(1432～1442)

艾比湖流域（79°53′~83°53′E，44°02′~45°23′N）位于新疆西北部，是准噶尔盆地西部最低的汇水中心。自20世纪50年代以来，由于大规模的水土开发，灌区人口、灌溉面积和引水量大幅度增加，原来有水注入艾比湖的大部分河流先后断流，导致入湖水量急剧减少，流域径流不仅要承担人们生产生活供水任务，还要为维持当地良好生境提供生态用水，2019年生态环境用水量仅占总用水量的3.1%，当地社会经济–生态环境用水矛盾日益增加。博尔塔拉河（简称博河）是艾比湖的主要入湖水源，近40 a补给水量达入湖总量的70%，博河水量变化直接关乎艾比湖面积增减及湖周生态状况，对艾比湖生态修复保护发挥基础性的支撑作用。博河第一次冰川编目条数为255条、面积216.91 km²；第二次冰川编目条数已经退减到243条，面积消融至113.75 km²。两次冰川编目数据相比，博河冰川消失12条，面积缩减103.15 km²。随着全球进一步增暖，气候模式预估全球水循环进一步增强，水循环季节差异增大[1]。博河上游地区位于高山区，在气候变化背景下，山区冰川消融加剧，导致极端水文事件的发生概率增多，河流水文过程将会变得更为复杂[2]。因此，开展气候变化背景下博河径流变化预测，对预防气候变化带来的潜在水资源风险，保障当地社会经济发展与生态文明建设显得十分迫切。

目前，针对径流的研究主要包括寻找数据间的最优数学关系为目标的数据驱动模型[3]和以水文学概念为基础考虑物理过程的水文模型[4]。与数据驱动模型相比，水文模型能真实、有效地模拟流域径

收稿日期：2022-10-24； **修订日期：**2022-12-14
基金项目：第三次新疆综合科学考察（2021xjkk0406）；新疆水利科技项目科研专项（Xskj-2021-01）资助
作者简介：田昊玮（1998-），男，硕士研究生，主要从事水文水资源研究. E-mail: 545734560@qq.com
通讯作者：龙爱华（1976-），男，教授级高级工程师，博士生导师，主要从事流域水循环与西北水资源规划配置研究. E-mail: ahlong@iwhr.com

流形成过程，客观地反映气候或下垫面变化对流域水循环的影响程度[5]，是研究水文循环机理和过程、解决复杂水文问题的有效基础工具[6]。在众多水文模型中，SWAT模型具有很高的普适性，在各流域的模拟应用中[7-11]，均取得了较好的效果；在对气候变化的研究过程中，SWAT模型成为国内外研究人员开展工作最常用的模型之一，如Shukla等[12]、Cao等[13]、Zhao等[14]分别运用SWAT模型在Satluj流域、呼伦湖流域、白山盆地等开展了气候变化情景对径流的影响研究。同时，SWAT模型和其他模块具有耦合性，杨明智等[15]基于SWAT模型嵌入水资源配置模块，实现了"自然-社会"二元水循环与水资源实时配置一体化模拟功能；Yin等[16]将SWAT模型嵌入冰川模块，解决了SWAT模型在高寒山区模拟精度不高的问题，并定量估算了叶尔羌河流域冰川对径流的贡献。可以看出，SWAT模型不仅在广泛应用于各流域和气候变化的研究中，还能针对自身薄弱点，因地制宜地耦合相关模块，提高模型模拟精度。

在博河以往的研究中，多侧重从融雪描述径流机理[17-18]和水质[19]、水化学[20]、降水[21]、地下地表水同位素变化特征[22]等方面的研究，很少关注气候变化对博河流域水文过程的影响。本研究以博河上游为研究区，将冰川模块嵌入SWAT模型中，构建能够刻画冰川径流的冰川增强型SWAT模型，并耦合CMIP5气候变化模式中的不同情景，预测未来径流增减情况，揭示引起径流变化的主要驱动因子，以期为变化环境下的流域水资源管理措施提供辅助支撑。

1 研究区概况

博河流域(79°53′~83°53′E，44°02′~45°23′N)地处西天山北坡的阿拉套山，全长252 km，近60 a平均径流量为5.1×10^8 m^3，经温泉县和博乐市后注入艾比湖，并以温泉县和博乐市为界，将博河分为上、中、下游，其中冰川面积为110.3 km^2，冰川补给量约为1.05×10^8 m^3(图1)。博河温泉站以上集水面积为2206 km^2，全长97 km。年均气温为6.6~7.8 ℃，其中5—9月的气温达到10 ℃以上，最高是7月；多年平均降水量为288.63 mm，主要集中在4—9月，6个月内降水量约占全年的80.7%，其中降水量最大的月份是7月。可见，夏季是气温增高、降水增多的集中时段，最高月份均出现在7月，雨热同期。全年径流呈现中间高两头低的单峰分布，年内径流主要集中发生在6—8月，3个月内径流量约占全年的40.62%，其他9个月份径流量相对平均，均为0.2×10^8 m^{3}左右。

2 数据与方法

2.1 研究方法

2.1.1 SWAT模型 SWAT模型是在美国农业部(USDA)的农业研究中心Jeff Arnold博士的主持下，于1994年将SWRRB模型与ROTO模型整合到一起，开发出了SWAT模型。该模型经过几十年的发展，已经被广泛应用于径流模拟、泥沙、点源污染等方面[23-25]。在SWAT模拟各计算单元的水循环过程

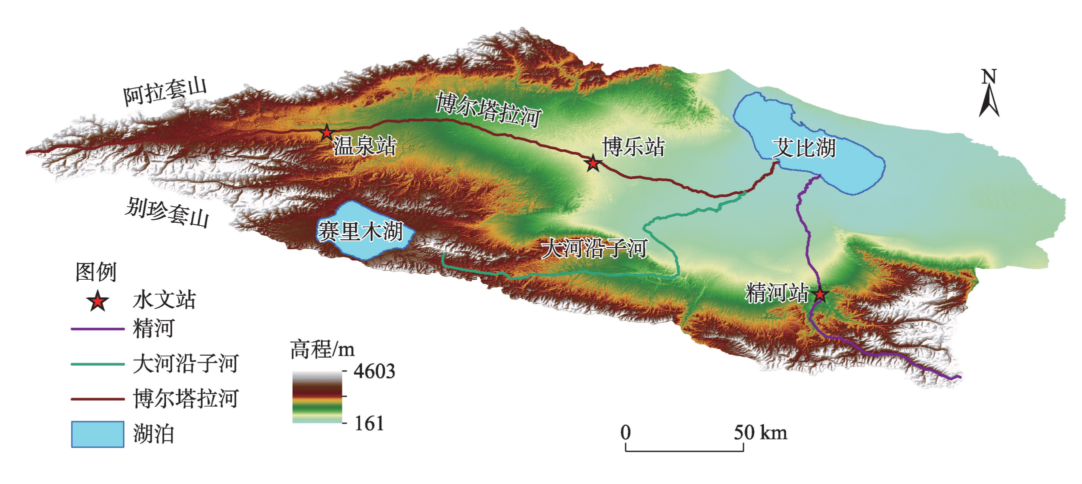


图1 艾比湖水系分布

Fig. 1 Distribution of Ebinur Lake river system

时，水量平衡法则是根本驱动力。模型首先根据数字高程模型(DEM)数据、土壤类型、土地利用类型及坡度，细分流域反映不同作物和土壤类型的蒸散发差异，然后模拟各水文响应单元的径流量，最后汇总得到流域的总径流量，物理意义明确。

$$SW_t = SW_0 + \sum_{i=1}^{t}\left(R_{day} - Q_{surf} - E_a - W_{seep} - Q_{gw}\right) \quad (1)$$

式中：SW_t 为土壤最终含水量(mm)；SW_0 为第 i 天的土壤初始含水量(mm)；t 为时间(d)；R_{day} 为第 i 天的降水量(mm)；Q_{surf} 为第 i 天的地表径流量(mm)；E_a 为第 i 天的蒸散发量(mm)；W_{seep} 为第 i 天从土壤剖面进入包气带的水量(mm)；Q_{gw} 为第 i 天回归流的水量(mm)。

2.1.2 冰川模块算法 SWAT模型具有较强的径流演化与溶质迁移模拟功能，但对干旱区内陆河流域径流的重要组分——冰川融水模拟考虑不足[26]。Yin等[16]根据冰川融化因子和气温的关系，考虑太阳辐射和地形等因素的影响，修正了温度指数模型，对冰川水文过程的模拟更具物理意义。

$$M = \begin{cases} (F_M + R_{ice} I_{pot})(T - T_{mlt,ice}), & T > T_{mlt,ice} \\ 0, & T \leqslant T_{mlt,ice} \end{cases} \quad (2)$$

式中：M 为冰川日融化量(mm)；F_M 为冰温融化因子；R_{ice} 为冰辐射融化因子；I_{pot} 为潜在太阳辐射；T 为日平均气温(℃)；$T_{mlt,ice}$ 为冰川融化温度阈值(℃)。有关应用表明[27-28]，这一改进对提高干旱内陆河径流模拟具有较好的完善作用。

2.1.3 模型评价 本文选定4个评价指标作为评判模拟结果好坏的标准，分别是纳什系数(NSE)、均方根误差与实测值标准差的比值(RSR)、偏差百分比(PBIAS)和决定性系数(R^2)，其中 R^2 表示模拟值与实测值的相关程度，取值范围为0~1，越接近1表明相关性越好，具体评价标准[29]见表1。各指标计算公式如下：

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{1}^{n}\left(Q_i^{obs} - Q_i^{sim}\right)^2}{\sum_{1}^{n}\left(Q_i^{obs} - Q_{avg}^{obs}\right)^2} \quad (3)$$

$$RSR = \frac{RMSE}{STDEV_{obs}} = \frac{\sqrt{\sum_{1}^{n}\left(Q_i^{obs} - Q_i^{sim}\right)^2}}{\sqrt{\sum_{1}^{n}\left(Q_i^{obs} - Q_{avg}^{obs}\right)^2}} \quad (4)$$

$$PBIAS = \frac{\sum_{1}^{n}\left(Q_i^{obs} - Q_i^{sim}\right)}{\sum_{1}^{n} Q_i^{obs}} \times 100\% \quad (5)$$

表1 模型评价标准

Tab. 1 Model evaluation criteria

模拟结果	NSE	RSR	PBIAS/%
优	0.75<NSE≤1.00	0.00≤RSR≤0.50	|PBIAS|<10
良	0.65<NSE≤0.75	0.50<RSR≤0.60	10≤|PBIAS|<15
合格	0.50<NSE≤0.65	0.60<RSR≤0.70	15≤|PBIAS|<25
不合格	NSE≤0.50	RSR>0.70	|PBIAS|≥25

注：NSE为纳什系数；RSR为均方根误差与实测值标准差的比值；PBIAS为偏差百分比。下同。

$$R^2 = \frac{\left(\sum_{1}^{n}(Q_i^{obs} - Q_{avg}^{obs})(Q_i^{sim} - Q_{avg}^{sim})\right)^2}{\sum_{1}^{n}\left(Q_i^{obs} - Q_{avg}^{obs}\right)^2 \sum_{1}^{n}\left(Q_i^{sim} - Q_{avg}^{sim}\right)^2} \quad (6)$$

式中：Q_i^{sim} 为时间步长 i 内模型模拟的河道径流量(m^3)；Q_i^{obs} 为时间步长 i 内水文站实际观测的河道径流量(m^3)；Q_{avg}^{sim} 和 Q_{avg}^{obs} 分别为模拟时间段内模拟和观测的平均径流量(m^3)。

2.2 数据来源及模型建立

2.2.1 数据来源与处理 驱动SWAT模型的数据有DEM数据、土壤数据、土地利用数据、气象数据等。DEM数据来自地理空间数据云平台，空间分辨率为90 m(http://www.gscloud.cn/)。土壤数据来自中国科学院南京土壤所发布的1:1000000土壤数据库，其中土壤容重(SOL_BD)、饱和导水率(SOL_K)和田间持水量(SOL_AWC)等参数通过SPAW模型计算得到，然后将数据重分类成12种土壤类型。土地利用数据来自地理空间数据云2018年30 m分辨率土地利用数据(http://www.gscloud.cn/)，经过重分类以后共有10种土地利用类型。

水文数据来源博尔塔拉水文探勘局，其中包括温泉站1972—2018年逐月径流数据。气象数据为流域内国家气象站点1968—2018年的监测数据，包括降水、平均气温、最高气温、最低气温。用于预测的气象数据来自第五次国际耦合模式比较计划(CMIP5)的预测数据，从中选取8个GCM(Global climate model)数据(表2)，包括中低浓度排放情景(RCP4.5)和高浓度排放情景(RCP8.5)2种情景模式下2020—2050年的最高气温、最低气温、降水数据。对这些数据首先运用双线性插值法将各模式的分辨率统一成0.5°×0.5°，然后采用RoMBC(Robust multivariate bias correction)方法对模式输出数据进行偏差校正，该方法能有效降低数据的系统误

表2 CMIP5全球气候模式基本信息

Tab. 2 Basic information of CMIP5 global climate models

编号	CMIP5模式	所属国家	所属机构	水平分辨率
1	ACCESS1-0	澳大利亚	CSIRO-BOM	1.9°×1.2°
2	ACCESS1-3	澳大利亚	CSIRO-BOM	1.9°×1.2°
3	NRM-CM5	法国	CNRM-CERFACS	1.4°×1.4°
4	HadGEM2-CC	英国	MOHC	1.9°×1.2°
5	HadGEM2-ES	英国	MOHC	1.9°×1.2°
6	MIROC5	日本	MIROC	1.4°×1.4°
7	MRI-CGCM3	日本	MRI	1.1°×1.1°
8	BCC-CSM1-1-M	中国	NCC	1.1°×1.1°

差[30]，最后根据多模式等权重的集合平均方法[31]输出2种情景模式下降水、气温数据，分析2种情景模式下对研究区径流变化的影响。

2.2.2 博河上游SWAT模型构建 本文以0.8 km²作为集水阈值，将研究区划分为19个子流域，1095个水文响应单元，在此基础上输入历史气象数据构建出SWAT模型。基于水文站实测月径流资料，通过调整参数获得历史最优模拟情况，运用模型评价指标评定模拟结果，最后将CMIP5多模式集合未来情景数据带入率定好的模型中，对未来博河上游径流进行预测和变化分析。图2为在构建SWAT模型模拟方案时的DEM、子流域划分、土地利用和土壤类型的空间分布图。

3 结果与分析

3.1 模型参数化与效果评估

官方发布的SWAT模型对冰川消融过程模拟欠缺，因此在模型构建时加入冰川模块[16]。采用swat-cup中的SUFI-2算法对参数进行敏感性分析，结合敏感性分析结果、各参数的物理意义以及研究区特殊的水文过程，采用试错法逐步调整关键参数，得到最终率定结果（表3）。

以1968—1971、1972—1996、1997—2018年分别作为模型的预热期、率定期、验证期，对研究区月径流进行模拟（图3、表4）。校准期和验证期NSE分别为0.81和0.83，NSE>0.75，模拟结果为优；校准期和验证期RSR分别为0.44和0.41，RSR<0.5，模拟结果为优；校准期和验证期PBIAS分别为0.26%和−6.84%，|PBIAS|<10%，模拟结果为优；校准期和验证期R^2分别为0.82和0.86，很接近1，模拟值与实测值相关性很好，模型整体评价为优。以上综合表明，加入冰川模块的SWAT模型在博河上游的模拟结果较为可靠，模型参数设置合理，可用于该流域的径流过程模拟和气候变化的响应研究。

3.2 水文气象因子变化分析

根据博河上游温泉站1968—2018年实测水文资料及情景模式水文资料，分析其降水、气温变化

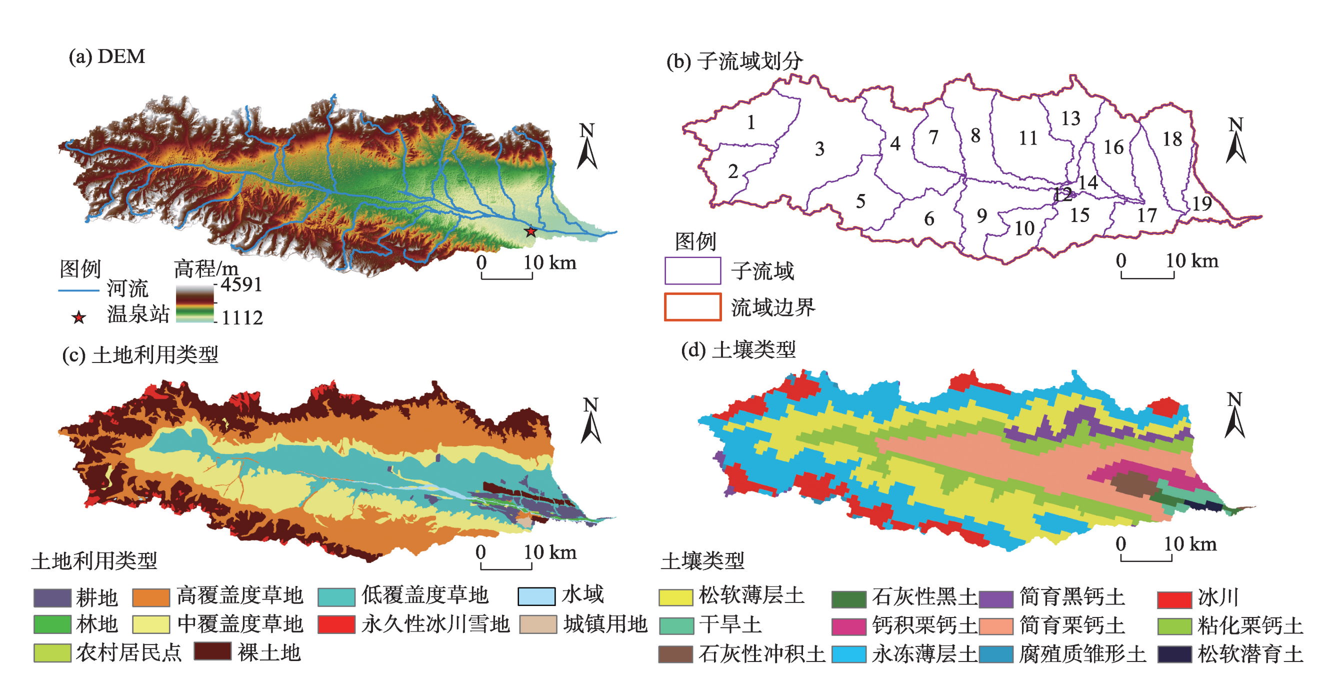


图2 数字高程模型(DEM)、子流域划分、土地利用类型和土壤类型的空间分布

Fig. 2 Spatial distributions of DEM, subwatershed division, land use types and soil types

表3 参数率定结果

Tab. 3 Parameter calibration results

参数模块	参数	物理意义	范围	参数最优值
径流	ALPHA_BF.gw	基流α因子/d	[0, 1]	0.0084
	GW_DELAY.gw	地下水的时间延迟/d	[0, 500]	120.00
	GWQMIN.gw	发生回归流所需的浅水层的水位阈值/mm	[0, 5000]	100.00
	REVAPMN.gw	渗入深水层所需的含水层的水位阈值/mm	[0, 1000]	1000.00
	CH_K2.rte	主河道冲积物的有效渗透系数/mm·h^{-1}	[0, 500]	30.00
	ESCO.hru	土壤蒸发补偿因子	[0, 1]	0.70
融雪	SFTMP.bsn	降雪气温/℃	[−5, 5]	1.00
	SMTMP.bsn	融雪气温/℃	[−5, 5]	0.50
	SMFMX.bsn	6月21日的融雪因子/mm·℃$^{-1}$·d^{-1}	[0, 10]	6.50
	SMFMN.bsn	12月21日的融雪因子/mm·℃$^{-1}$·d^{-1}	[0, 10]	1.50
	TIMP.bsn	积雪温度滞后因子	[0.01, 1.00]	1.00
冰川	Bmelt6	6月21日的融冰因子/mm·℃$^{-1}$·d^{-1}	[1.4, 16.0]	3.50
	Bmelt12	12月21日的融冰因子/mm·℃$^{-1}$·d^{-1}	[1.4, 16.0]	0.50
	gmlt_tmp	融冰温度阈值/℃	[−5, 5]	1.44

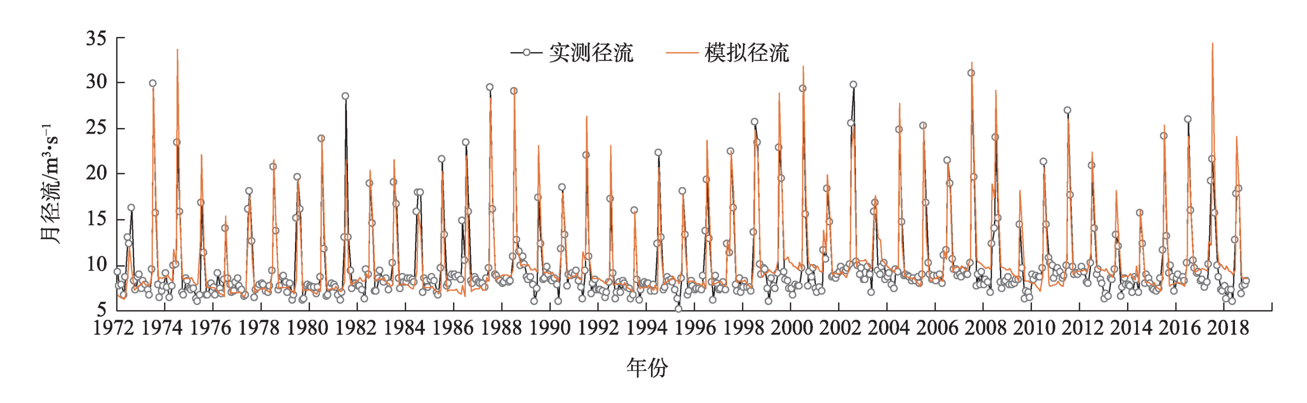


图3 1972—2018年温泉站月平均流量模拟结果

Fig. 3 Simulation results of monthly average flow of Wenquan station during 1972—2018

表4 博尔塔拉河上游流域模拟结果评价

Tab. 4 Evaluation on simulation results of upper watershed of Bortala River

水文站	时段	NSE	RSR	PBIAS/%	R^2
温泉水文站	校准期(1972年1月—1996年12月)	0.81	0.44	0.26	0.82
	验证期(1997年1月—2018年12月)	0.83	0.41	−6.84	0.86
	全时段(1972年1月—2018年12月)	0.82	0.42	−3.22	0.84

注:R^2为决定系数。

趋势(图4)。2种模式下平均气温分别为5.83 ℃和6.93 ℃,较历史时期4.15 ℃都升温1.50 ℃以上,升温趋势显著,这也与IPCC第一工作组评估报告[32]预测结果相符。2种气候模式下未来降水量分别为328.26 mm和302.14 mm,较历史时期年均降水量288.63 mm分别增长了13.73%(RCP4.5)和4.70%(RCP8.5),其增速分别为13.21 mm·(10a)$^{-1}$(RCP4.5)和4.35 mm·(10a)$^{-1}$(RCP8.5)。RCP4.5降水量的增速明显大于RCP8.5,其原因可能是增温导致蒸发量加剧,进而抵消了水循环加快使降水增加的积极影响[33]。此外,通过累积距平法发现,2种气候模式的气温和降水到2050年并未出现明显拐点,这表明增温增湿还将继续。

用2种气候模式的降水、气温数据驱动率定好

的SWAT模型，分别得到各模式下的模拟径流。从年际变化趋势(图5)来看，在气温和降水的综合影响下，RCP4.5和RCP8.5情景模式中，年均径流量分别为4.09×10^8 m^3和4.36×10^8 m^3，较历史时期年径流量3.16×10^8 m^3分别增加了0.93×10^8 m^3和1.2×10^8 m^3，增速分别为0.31×10^8 $m^3\cdot(10a)^{-1}$和0.40×10^8 $m^3\cdot(10a)^{-1}$。冰川径流对总径流的贡献率由历史时期的27.61%提升到32.45%(RCP4.5)和36.99%(RCP8.5)，较历史时期分别增长了4.84%和9.38%，冰川加速消融导致冰川贡献率占比提升是径流量增加的主要原因。从年内变化趋势(图6)来看，RCP4.5冰川径流主要是从4月开始到9月结束，而RCP8.5冰川径流主要是从3月开始到9月结束，这也说明升温会导致冰川消融时间提前。2种模式下模拟的月内径流主要集中在7、8月，7月达到峰值，峰值流量分别为41.00 $m^3\cdot s^{-1}$(RCP4.5)和50.65 $m^3\cdot s^{-1}$(RCP8.5)，这也与冰川径流峰值重合，7、8月冰川径流占当月径流量65%以上，占全年冰川径流的60%。值得注意的是，冰川消融峰值与汛期重合，气候变暖导致冰川加速消融会加剧水系统脆弱性和河川径流的波动性，使汛期极端水文事件的发生概率多于历史时期[2]。

3.3　气候变化对径流的影响

将1972—2018年实测数据和2020—2050年2种气候模式模拟数据的月径流、月降水、月均温数据按照季节春(3—5月)、夏(6—8月)、秋(9—11月)、冬(12月—翌年2月)划分，分别采用Pearson相关系数进行双侧检验(表5、表6、表7)。按照季节对比分析可以发现，径流在春季与气温的相关性随着温度的上升相关性也随之上升，这也证实了气候变暖会导致冰川消融时间提前；径流在夏季与气温均通过0.01显著性检验，且相关性不断提高，这也说明夏季增温会导致冰川消融加速，使博河上游径流量增加，这也印证了迪丽努尔·阿吉等[34]得到的结论。秋冬两季的温度基本在0 ℃以下，气温与径流

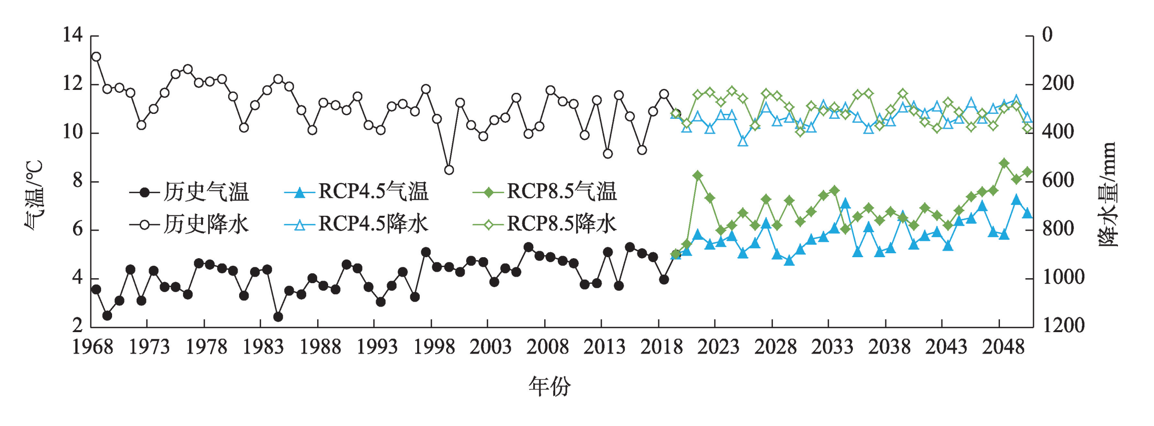


图4　温泉站水文数据及情景模式年际变化趋势

Fig. 4　Inter annual variation trends of hydrological data and scenario models of Wenquan station

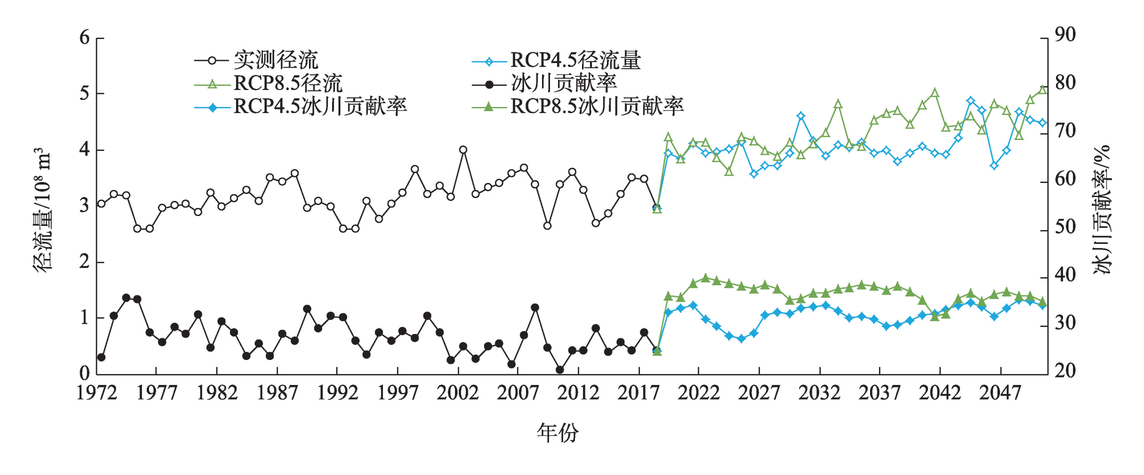


图5　实测径流、模拟年径流、冰川贡献率年际变化趋势

Fig. 5　Inter annual variation trends of measured runoff, simulated annual runoff and glacier contribution rates

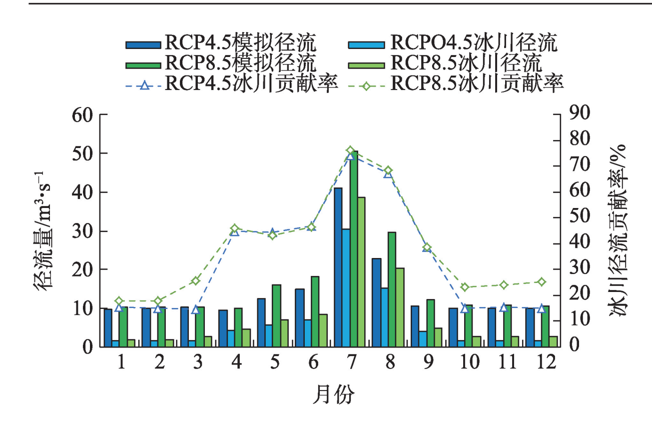


图6 模拟情景径流、情景冰川径流、冰川贡献率年内变化趋势

Fig. 6 Annual change trend of simulated scenario runoff, scenario glacier runoff and glacier contribution rates

的相关性不高,气温与降水的相关性较高,秋冬两季主要通过降水的形式促进冰川的积累。但秋季气温与降水的相关性随着气温的升高,相关性也随之降低,这改变了冰川的积累、消融规律,导致冰川面积进一步的缩减,冰川调节能力下降。

4 讨论

博尔塔拉河上游属于高寒山区,径流主要以高山降水和冰川融雪为主。众多学者在研究博河径流时,多是考虑降水和融雪对径流的影响[18,21],而忽视了高寒山区冰川消融对径流的影响,孟现勇等[17]采用SWAT+CMADS模拟精博河发现温泉站的模拟精度低于精河站,猜测是因为温泉上游高寒山区冰川对温泉站模拟结果影响较大。本文将SWAT模型和冰川模块耦合,该模块在众多的以冰川径流占比较高的径流模拟中均有较好的适用性[11,16,27-28],弥补了SWAT模型冰川消融过程模拟欠缺的问题,能有效提高模型在高寒山区的模拟精度。

气温变化是导致冰川消融速率改变的主要因素。通过对未来的气温分析发现,未来气温平均升高1.5 ℃。有学者预估了在1.5 ℃升温条件下,亚洲

表5 历史水文数据突变对比分析

Tab. 5 Comparison and analysis of abrupt changes in historical hydrological data

历史	春季			夏季		
	降水	气温	径流	降水	气温	径流
降水量	1.000	0.541**	0.013	1.000	−0.143	0.178*
气温	0.541**	1.000	−0.237**	−0.143	1.000	0.503**
径流	0.013	−0.237	1.000	0.178*	0.503**	1.000
历史	秋季			冬季		
	降水	气温	径流	降水	气温	径流
降水量	1.000	0.360**	0.178*	1.000	0.253**	0.017
气温	0.360**	1.000	−0.173*	0.253**	1.000	−0.060
径流	0.178*	−0.173	1.000	0.017	−0.060	1.000

注:*、**分别表示通过0.05、0.01显著性水平检验。下同。

表6 RCP4.5情景模式径流、气温、降水相关系数

Tab. 6 Correlation coefficients of runoff, temperature and precipitation in RCP4.5 scenario model

RCP4.5	春季			夏季		
	降水	气温	径流	降水	气温	径流
降水	1.000	0.704**	0.321**	1.000	−0.004	−0.120
气温	0.704**	1.000	0.486**	−0.004	1.000	0.733**
径流	0.321**	0.486**	1.000	−0.120	0.733**	1.000
RCP4.5	秋季			冬季		
	降水	气温	径流	降水	气温	径流
降水	1.000	0.004	0.103	1.000	0.124	−0.062
气温	0.004	1.000	0.028	0.124	1.000	0.042
径流	0.103	0.028	1.000	−0.062	0.042	1.000

表7　RCP8.5情景模式径流、气温、降水相关系数

Tab. 7　Correlation coefficients of runoff, temperature and precipitation in RCP8.5 scenario model

RCP8.5	春季			夏季		
	降水	气温	径流	降水	气温	径流
降水	1.000	0.641**	0.236**	1.000	-0.395**	-0.155
气温	0.641**	1.000	0.540**	-0.395**	1.000	0.870**
径流	0.236**	0.540**	1.000	-0.155	0.870**	1.000
RCP8.5	秋季			冬季		
	降水	气温	径流	降水	气温	径流
降水	1.000	-0.135	-0.045	1.000	0.261*	0.142
气温	-0.135	1.000	0.203	0.261*	1.000	0.113
径流	-0.045	0.203	1.000	0.142	0.113	1.000

高山区到21世纪末冰川损失量超过一半以上[35]，这意味着因冰川消融速率加快带来的径流量增加是不可持续的，冰川调节能力的下降会增加径流量变率[2]，给水资源管理者带来新的挑战。

本研究仍存在不足之处。研究区枯水期相较于丰水期拟合较差，导致枯水期模拟效果较差的原因是，博河自西向东流至温泉时，经过断陷盆地、基地隆起等地质结构，导致地表水地下水频繁转换[36]，频繁的地表水和地下水转换，使得枯水期的径流量呈现出无规则的波动，进而增加模拟枯水期径流量时的难度。今后研究中考虑将SWAT模型与MODFLOW模型等地下水模型进行耦合，进一步提高模拟精度。冰川模块中的冰川消融因子(冰辐射融化因子)属于经验参数，模拟径流时是以多年径流过程线为参照物进行调参的，单纯的径流校正会因降水径流模拟的不准确导致冰川消融因子的低估和高估，从而影响径流组分的分割[37]。如何降低因调参带来的模型模拟差异，从而做到精准化分析径流组分是今后值得讨论的问题之一。

5　结　论

本文以博尔塔拉河源流区为靶区，构建嵌入冰川模块的SWAT模型，在CMIP5不同情景模式下，预测径流变化趋势，评估气候变化对径流的影响。主要结论如下：

(1) 考虑冰川融化对径流的影响，构建嵌入冰川模块SWAT模型。结果表明，嵌入冰川模块的SWAT模型，全时段的NSE为0.82，RSR为0.42，RBIAS为-3.22%，R^2为0.84，模型评价结果为优，证明本次模型的构建在该流域有很好的适用性。

(2) 在CMIP5的RCP4.5和RCP8.5情景模式中，未来平均气温分别为5.83 ℃和6.93 ℃，未来降水量分别为328.26 mm和302.14 mm，两者较历史时期均表现出增加的趋势。用2种气象数据模拟径流，得到的年均径流量历史时期年均径流量分别增加了0.93×10^8 m^3和1.2×10^8 m^3。冰川径流对总径流的贡献率分别增长了4.84%和9.38%，冰川加速消融导致冰川径流占比增大是径流增大的主要原因。RCP8.5比RCP4.5冰川消融提前了一个月，表明升温会导致冰川消融时间提前。冰川消融峰值和汛期重合，会加剧了水系统脆弱性和河川径流的波动性，使汛期极端水文事件的发生概率多于历史时期。

(3) 按照季节将历史和2种气候模式的径流、降水、气温进行分类并进行相关性分析发现，随着气温的升高，冰川消融时间提前，冰川消融加速，冰川的积累时间减少，导致冰川面积进一步的缩减。

参考文献(References)

[1] 姜大膀, 王娜. IPCC AR6报告解读:水循环变化[J]. 气候变化研究进展, 2021, 17(6): 699-704. [Jiang Dabang, Wang Na. Water cycle changes: Interpretation of IPCC AR6[J]. Climate Change Research, 2021, 17(6): 699-704.]

[2] 陈亚宁, 李稚, 方功焕. 中亚天山地区关键水文要素变化与水循环研究进展[J]. 干旱区地理, 2022, 45(1): 1-8. [Chen Yaning, Li Zhi, Fang Gonghuan. Changes of key hydrological elements and research progress of water cycle in the Tianshan Mountains, Central Asia[J]. Arid Land Geography, 2022, 45(1): 1-8.]

[3] 王文, 马骏. 若干水文预报方法综述[J]. 水利水电科技进展, 2005(1): 56-60. [Wang Wen, Ma Jun. Review on some methods for hydrological forecasting[J]. Advances in Science and Technolo-

gy of Water, 2005(1): 56-60.]

[4] 雷晓辉, 王浩, 廖卫红, 等. 变化环境下气象水文预报研究进展[J]. 水利学报, 2018, 49(1): 9-18. [Lei Xiaohui, Wang Hao, Liao Weihong, et al. Advance in hydro-meteorological forecast under changing environment[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2018, 49(1): 9-18.]

[5] 史晓亮, 杨志勇, 严登华, 等. 滦河流域土地利用/覆被变化的水文响应[J]. 水科学进展, 2014, 25(1): 21-27. [Shi Xiaoliang, Yang Zhiyong, Yan Denghua, et al. On hydrological response to land-use/cover change in Luanhe River Basin[J]. Advances in Water Science, 2014, 25(1): 21-27.]

[6] 包鑫, 江燕. 半干旱半湿润地区流域非点源污染负荷模型研究进展[J]. 应用生态学报, 2020, 31(2): 674-684. [Bao Xin, Jiang Yan. Research progress on non-point source pollution models for semi-arid and semi-humid watersheds[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2020, 31(2): 674-684.]

[7] Fabre C, Sauvage S, Tananaev N, et al. Assessment of sediment and organic carbon exports into the Arctic Ocean: The case of the Yenisei River Basin[J]. Water Research, 2019, 158: 118-135.

[8] 孙占东, 黄群. 长江流域土地利用/覆被变化的大尺度水文效应[J]. 长江流域资源与环境, 2019, 28(11): 2703-2710. [Sun Zhandong, Huang Qun. Land use-cover change and its large scale hydrological effects in Yangtze River Basin[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2019, 28(11): 2703-2710.]

[9] 周帅, 王义民, 郭爱军, 等. SWAT模型参数不确定性对黄河上游径流模拟的影响[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2019, 47(8): 144-154. [Zhou Shuai, Wang Yimin, Guo Aijun, et al. Influence of uncertainties in SWAT model parmeters on runoff simulation in upper reaches of the Yellow River[J]. Journal of Northwest A & F University (Natural Science Edition), 2019, 47(8): 144-154.]

[10] Avellaneda P M, Ficklin D L, Lowry C S, et al. Improving hydrological models with the assimilation of crowdsourced data[J]. Water Resources Research, 2020, 56(5): e2019WR026325, doi: 10.1029/2019WR026325.

[11] 任才, 龙爱华, 於嘉闻, 等. 气候与下垫面变化对叶尔羌河源流径流的影响[J]. 干旱区地理, 2021, 44(5): 1373-1383. [Ren Cai, Long Aihua, Yu Jiawen, et al. Effects of climate and underlying surface changes on runoff of Yarkant River source[J]. Arid Land Geography, 2021, 44(5): 1373-1383.]

[12] Shukla S, Jain S K, Kansal M L. Hydrological modelling of a snow/glacier-fed western Himalayan Basin to simulate the current and future streamflows under changing climate scenarios[J]. Science of the Total Environment, 2021, 795, doi: 10.1016/J.SCITOTENV.2021.148871.

[13] Cao Y, Fu C S, Wang X, et al. Decoding the dramatic hundred-year water level variations of a typical great lake in semi-arid region of northeastern Asia[J]. Science of the Total Environment, 2021, 770, doi: 10.1016/J.SCITOTENV.2021.145353.

[14] Zhao H L, Li H Y, Xuan Y Q, et al. Improvement of the SWAT model for snowmelt runoff simulation in seasonal snowmelt area using remote sensing data[J]. Remote Sensing, 2022, 14(22): 5823, doi: 10.3390/RS14225823.

[15] 杨明智, 许继军, 桑连海, 等. 基于水循环的分布式水资源调配模型开发与应用[J]. 水利学报, 2022, 53(4): 456-470. [Yang Mingzhi, Xu Jijun, Sang Lianhai, et al. Development and application of the distributed water resources allocation and regulation model based on hydrological cycle[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2022, 53(4): 456-470.]

[16] Yin Z L, Feng Q, Liu S Y, et al. The spatial and temporal contribution of glacier runoff to watershed discharge in the Yarkant River Basin, northwest China[J]. Water, 2017, 9(3): 159, doi: 10.3390/w9030159.

[17] 孟现勇, 王浩, 雷晓辉, 等. 基于CMDAS驱动SWAT模式的精博河流域水文相关分量模拟、验证及分析[J]. 生态学报, 2017, 37(21): 7114-7127. [Meng Xianyong, Wang Hao, Lei Xiaohui, et al. Simulation, validation, and analysis of the hydrological components of Jing and Bo River Basin based on the SWAT model driven by CMADS[J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(21): 7114-7127.]

[18] 王瑾杰, 丁建丽, 张喆, 等. 干旱区降雨、融雪混合补给下的径流模拟研究——以博尔塔拉河上游流域为例[J]. 干旱区地理, 2016, 39(6): 1238-1246. [Wang Jinjie, Ding Jianli, Zhang Zhe, et al. Simulation of runoff of arid area with rainfall and snowmelt based on GF-1 satellite: A case of Bortala River[J]. Arid Land Geography, 2016, 39(6): 1238-1246.]

[19] 张飞, 王维维, 辛红云, 等. 新疆艾比湖流域河湖水质变化(2005—2020年)[J]. 湖泊科学, 2022, 34(2): 478-495. [Zhang Fei, Wang Weiwei, Xin Hongyun, et al. Changes of river and lakes water quality in Lake Ebinur Basin, Xinjiang (2005—2020) [J]. Journal of Lake Sciences, 2022, 34(2): 478-495.]

[20] 丁启振, 雷米, 周金龙, 等. 博尔塔拉河上游河谷地区水化学特征及水质评价[J]. 干旱区研究, 2022, 39(3): 829-840. [Ding Qizhen, Lei Mi, Zhou Jinlong, et al. An assessment of groundwater, surface water, and hydrochemical characteristics in the upper valley of the Bortala River[J]. Arid Zone Research, 2022, 39(3): 829-840.]

[21] 刘世薇, 周华荣, 梁雪琼, 等. 艾比湖流域降水与径流变化特征分析[J]. 水土保持学报, 2011, 25(5): 21-25. [Liu Shiwei, Zhou Huarong, Liang Xueqiong, et al. Trend analysis of the precipitation and runoff in Ebinur Lake Basin[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2011, 25(5): 21-25.]

[22] 郝帅, 李发东, 李艳红, 等. 艾比湖流域降水、地表水和地下水稳定同位素特征[J]. 干旱区地理, 2021, 44(4): 934-942. [Hao Shuai, Li Fadong, Li Yanhong, et al. Stable isotopes characteristics of precipitation, surface water and groundwater in Ebinur Lake Basin[J]. Arid Land Geography, 2021, 44(4): 934-942.]

[23] 甘容, 徐孟莎, 左其亭. 伊洛河流域基流分割及其时空变化特征

[J]. 资源科学, 2022, 44(9): 1824−1834. [Gan Rong, Xu Mengsha, Zuo Qiting. Baseflow separation and spatiotemporal variation characteristics in the Yiluo River Basin[J]. Resources Science, 2022, 44(9): 1824−1834.]

[24] 张田田, 陈有超, 李潜, 等. 土地利用变化对丹江流域径流和泥沙时空格局的影响[J]. 长江流域资源与环境, 2022, 31(8): 1797−1811. [Zhang Tiantian, Chen Youchao, Li Qian, et al. Effects of land-use change on the spatio-temporal patterns of runoff and sediment in the Danjiang River Basin[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2022, 31(8): 1797−1811.]

[25] 侯玥, 徐成东, 刘伟, 等. 气候变化情景下淮河上游流域氮排放预测研究[J]. 地球信息科学学报, 2022, 24(8): 1558−1574. [Hou Yue, Xu Chengdong, Liu Wei, et al. Prediction of nitrogen emission in the upper reaches of the Huai River Basin under climate change scenarios[J]. Journal of Geo-information Science, 2022, 24(8): 1558−1574.]

[26] 孙瑞, 张雪芹. 基于SWAT模型的流域径流模拟研究进展[J]. 水文, 2010, 30(3): 28−32, 47. [Sun Rui, Zhang Xueqin. Progress in application of watershed runoff simulation based on SWAT[J]. Journal of China Hydrology, 2010, 30(3): 28−32, 47.]

[27] 魏潇娜, 龙爱华, 尹振良, 等. 和田河流域冰川径流对气候变化响应的模拟分析[J]. 水资源保, 2022, 38(4): 137−144. [Wei Xiaona, Long Aihua, Yin Zhenliang, et al. Simulation of response of glacier runoff to climate change in the Hotan River Basin[J]. Water Resources Protection, 2022, 38(4): 137−144.]

[28] Liu J, Long A H, Deng X Y, et al. The impact of climate change on hydrological processes of the glacierized watershed and projections [J]. Remote Sensing, 2022, 14(6): 1314, doi: 10.3390/rs14061314.

[29] Moriasi D N, Arnold J G, Liew M, et al. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations[J]. Transactions of the ASABE, 2007, 50(3): 855−900.

[30] Mehrotra R, Sharma A. A robust alternative for correcting systematic biases in multi-variable climate model simulations[J]. Environmental Modelling and Software, 139, 105019, doi:10.1016/j.envsoft.2021.105019.

[31] 吴佳, 周波涛, 徐影. 中国平均降水和极端降水对气候变暖的响应: CMIP5模式模拟评估和预估[J]. 地球物理学报, 2015, 58(9): 3048−3060. [Wu Jia, Zhou Botao, Xu Ying. Response of precipitation and its extremes over China to warming: CMIP5 simulation and projection[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2015, 58(9): 3048−3060.]

[32] 马占云, 任佳雪, 陈海涛, 等. IPCC第一工作组评估报告分析及建议[J]. 环境科学研究, 2022, 35(11): 2550−2558. [Ma Zhanyun, Ren Jiaxue, Chen Haitao, et al. Analysis and recommendations of IPCC working group I assessment report[J]. Research of Environmental Sciences, 2022, 35(11): 2550−2558.]

[33] Zhang Q, Yang J H, Wang W, et al. Climatic warming and humidification in the arid region of northwest China: Multi-scale characteristics and impacts on ecological vegetation[J]. Journal of Meteorological Research, 2021, 35(1): 113−127.

[34] 迪丽努尔·阿吉, 近藤昭彦, 肖開提·阿吉, 等. 博河流域气候变化及其与径流量的关系研究[J]. 资源科学, 2014, 36(10): 2123−2130. [Aji Dilinuer, Akihiko Kondoh, Aji Xiaokaiti, et al. Climatic change in the Bortala River Basin and runoff volume[J]. Resources Science, 2014, 36(10): 2123−2130.]

[35] Kraaijenbrink P D A, Bierkens M F P, Lutz A F, et al. Impact of a global temperature rise of 1.5 degrees Celsius on Asia's glaciers [J]. Nature, 2017, 549(7671): 257−260.

[36] 曾庆江. 博尔塔拉谷地对径流的调节作用[J]. 干旱区地理, 1994, 17(4): 9−14. [Zeng Qingjiang. Regulation of Bortala valley on runoff[J]. Arid Land Geography, 1994, 17(4): 9−14.]

[37] 赵求东, 赵传成, 秦艳, 等. 天山南坡高冰川覆盖率的木扎提河流域水文过程对气候变化的响应[J]. 冰川冻土, 2020, 42(4): 1285−1298. [Zhao Qiudong, Zhao Chuancheng, Qin Yan, et al. Response of the hydrological processes to climate change in the Muzati River Basin with high glacierization, southern slope of the Tianshan Mountains[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2020, 42(4): 1285−1298.]

Response and prediction of runoff to climate change in the headwaters of the Bortala River

TIAN Haowei[1,2], CHEN Fulong[1], LONG Aihua[1,2], LIU Jing[2,3], HAI Yang[2]

(1. College of Water and Architectural Engineering, Shihezi University, Shihezi 832000, Xinjiang, China; 2. Department of Water Resources, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China; 3. State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Simulation and Safety, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: Glacial runoff is a major component of runoff in the northwest arid zone of China. Understanding the impact of climate change on glacial runoff is crucial, but few studies have been conducted in this field of study in the Bortala River Basin, Xinjiang, China. In this paper, we present the glacier module that was added to the SWAT model and used to simulate monthly runoff in the headwater area of the upper Bortala River Basin. We successfully simulated monthly runoff at the Wenquan hydrological station during the period 1972—2018. Further, we investigated the impact of future climate change scenarios (RCP4.5 and RCP8.5 scenarios for 2020—2050, based on CMIP5 climate data) on glacier runoff. The model was able to accurately simulate changes in the source area's runoff process. The results showed that: For the whole simulation period, the Nash-Sutcliffe efficiency was 0.82, the percent bias was −3.22%, the ratio of root mean square error to standard deviation of measured value was 0.42, and the coefficient of determination was 0.84, thus allowing the model to be rated as "excellent". Increasing runoff trends were identified in the simulations of both future climate scenarios, with total runoff increases of 0.31×10^8 $m^3\cdot(10a)^{-1}$ and 0.40×10^8 $m^3\cdot(10a)^{-1}$ and increases in the percentage of glacial runoff of 4.84% and 9.38%, respectively, when compared with the historical period, in which the glacial runoff percentage was 27.61%. These increases in glacial runoff percentage are the main causes of the increases in runoff volume. Correlation analysis revealed that as the temperature increases, glacier ablation advances and accelerates, and glacier accumulation time decreases, leading to further future shrinking of glacier area. The study provides a basis for making changes to historical hydrological information, exploring future evolutionary trends, and mitigating potential climate change risks in the region.

Key words: SWAT model; climate change; CMIP5 climate scenario model; glacial runoff; Bortala River